

MEDIDA DE LAS CARGAS DEL VIENTO SOBRE LA CUBIERTA.

J. Meseguer,
S. Pindado,
A. Sanz y
J.M. Perales

El trabajo que se describe en este informe ha sido realizado durante los meses de Abril y Mayo de 2000 en las instalaciones del Laboratorio de Aerodinámica del Instituto Universitario "Ignacio Da Riva" de la Universidad Politécnica de Madrid (IDR/UPM), ubicado en la E.T.S.I. Aeronáuticos (28040 Madrid) de dicha Universidad. El modelo para ensayos aerodinámicos ha sido construido en el taller de modelismo del IDR/UPM por J. Pascual y M. Ortega. (Fig. I.1).

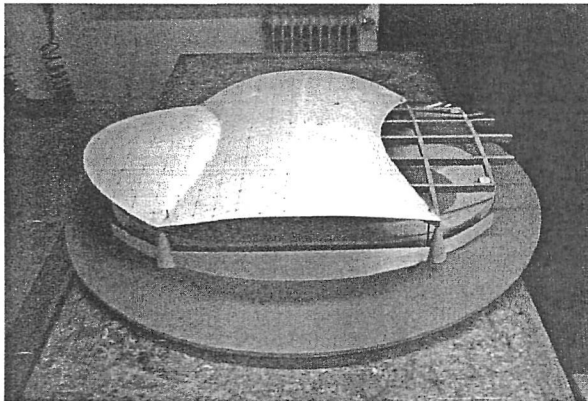


Fig. I.1 Vista de la maqueta terminada a ensayar.

INTRODUCCIÓN

En este informe se presentan los resultados de los ensayos de medida de las cargas aerodinámicas sobre la cubierta de un modelo del velódromo de la localidad de Dos Hermanas, en Sevilla. Estos ensayos han sido llevados a cabo, por encargo del Excmo. Ayuntamiento de Dos Hermanas a través del despacho de arquitectos Escrig & Sánchez, en el túnel aerodinámico A9 del

Laboratorio de Aerodinámica del Instituto Universitario "Ignacio Da Riva" de la Universidad Politécnica de Madrid (IDR/UPM).

Como es sabido, la validez de los ensayos de medida de las acciones del viento sobre modelos a escala en túneles aerodinámicos se fundamenta en el principio de semejanza dinámica de la mecánica de fluidos, que establece que en el caso del movimiento del aire alrededor de obstáculos los resultados adimensionales medidos en túnel serán aplicables a la realidad cuando exista semejanza geométrica y cuando se cumpla la igualdad de los números de Reynolds, Re , y la igualdad de los números de Mach, M , asociados al movimiento alrededor del modelo a escala y alrededor del obstáculo real. La semejanza geométrica exige que en los modelos a ensayar se reproduzcan fielmente a escala todos los detalles de la realidad que sean aerodinámicamente significativos. La igualdad de los números de Mach, $M = U/a$, donde U es la velocidad de la corriente incidente y a la velocidad del sonido, sólo es importante cuando el valor de este parámetro es razonablemente mayor que cero (de modo que su valor esté próximo o sea superior a la unidad), situación que no se produce en la mayoría de las aplicaciones de la aerodinámica no aeronáutica, en las que las velocidades en juego son mucho menores que la del sonido y, en consecuencia, el número de Mach es muy pequeño y el aire se

comporta como incompresible, ($M = 0$). Respecto al número de Reynolds, $Re = UL/$ (donde L es una longitud característica del obstáculo y la viscosidad cinemática del fluido), si el fluido en consideración es el mismo en ambos casos (ensayos y realidad), la igualdad de los números de Reynolds exige la conservación del producto UL , lo cual suele ser imposible, pues al disminuir la longitud característica de los modelos ensayados en túnel la conservación del producto UL requeriría aumentar el valor de la velocidad en la misma proporción, con lo que el movimiento dejaría de ser, probablemente, incompresible. Así pues lo normal es que no se pueda conservar el valor del número de Reynolds, lo que afortunadamente es irrelevante si se trata de aerodinámica no aeronáutica, pues enseña la experiencia que cuando los cuerpos expuestos al viento no son fuselados ni redondeados, los coeficientes adimensionales de fuerzas y momentos son independientes del valor del número de Reynolds una vez que este parámetro ha superado un cierto valor (el llamado Reynolds crítico).

La razón de este comportamiento es que en obstáculos con aristas o con bordes poco redondeados la capa límite se desprende en éstos para velocidades moderadamente pequeñas, situación que no cambia al aumentar la velocidad. Así pues, en la mayoría de las aplicaciones de la aerodinámica civil no será preciso conservar el número de Reynolds, bastando con comprobar que el número de Reynolds de los ensayos está por encima del valor crítico.

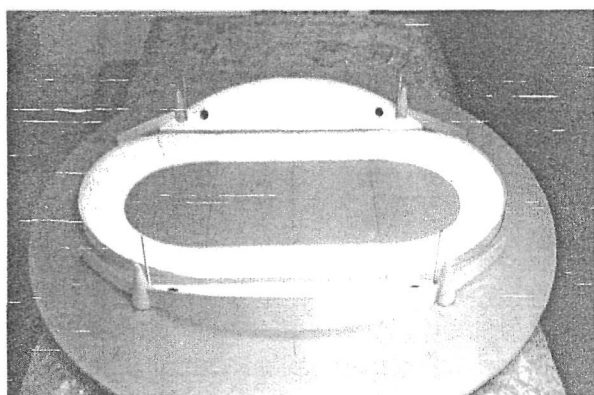


Fig. 1.21 Interior del velódromo. Pista, paredes laterales y gradas.

DEFINICIÓN DEL MODELO DE ENSAYOS Y DE LOS CASOS ENSAYADOS

Para la ejecución de los ensayos se ha construido un modelo a escala 1:150 del velódromo. En la fabricación de este modelo de ensayos se ha empleado aglomerado de madera isotrópico (MDF), contrachapado finlandés de 1.2 mm, madera de haya y metacrilato de 2 mm. La superficie de la pista del velódromo, las gradas y las paredes laterales fueron reproducidas con contrachapado sobre una base de MDF (figura 1.2). La cubierta se realizó con un armazón de costillas de MDF que conforma la superficie (figura 1.3), sobre éste se dispuso una chapa de contrachapado cortada según las dimensiones a escala de la cubierta del velódromo. En una zona de la cubierta el contrachapado fue substituido por metacrilato, para poder apreciar el interior sin tener que levantar la cubierta (figura 1.4). Cuatro conos torneados en madera de haya sirven de apoyo a la cubierta sobre las gradas del velódromo, la fijación de la cubierta se realiza mediante varilla roscada y tuercas con arandelas de presión (figura 1.5).

Sobre la cubierta fueron instaladas 92 tomas de presión, consistentes cada una en un agujero que comunica con un tubo de latón de 1mm de diámetro interior, y éste con un tubo de plástico que transmite la presión hasta el instrumento de medida (figura 1.6). La distribución de las tomas sigue la disposición que se muestra en el croquis de la figura 1.7, en éste todas las

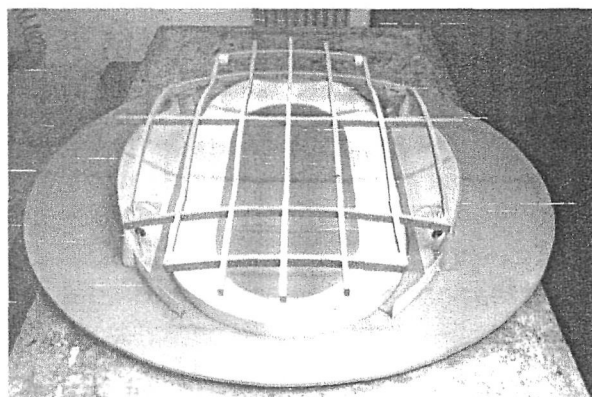


Fig. 1.3 Armazón de la cubierta del velódromo.

medidas están referidas al parámetro $\lambda = 50$ mm. Se observa que sólo existen tomas de presión en una de las mitades de la cubierta, ello es debido a la simetría del velódromo, la cual permite completar cada uno de los casos con dos ensayos.

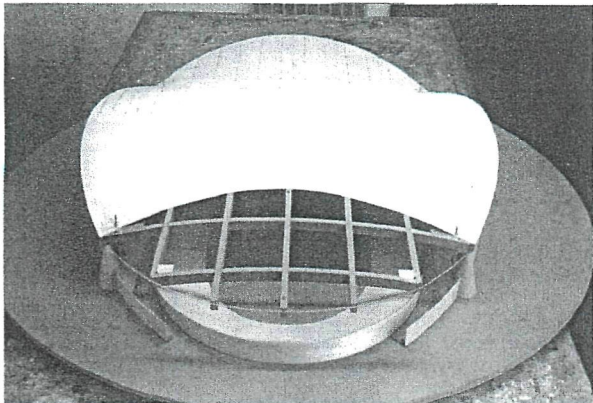


Fig. I.4 Cubierta del velódromo. Detalle de la parte hecha en metacrilato.

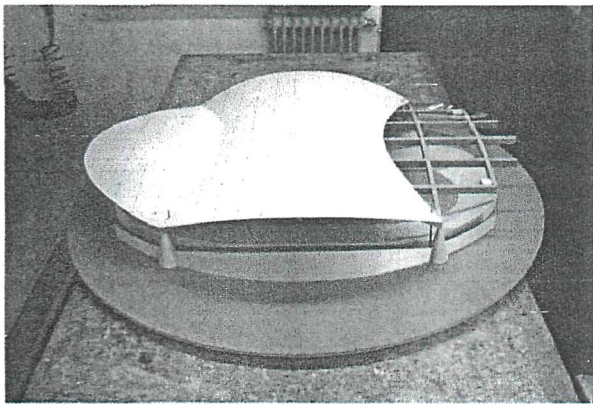


Fig. I.5 Cubierta del velódromo.

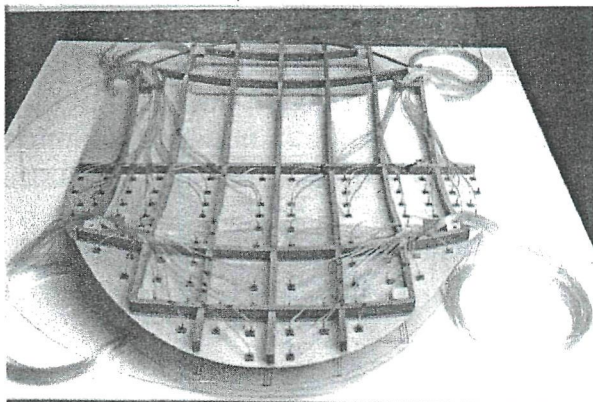


Fig. I.6 Vista de la cara inferior del recubrimiento donde se aprecia el sistema de tomas de presión de la cubierta del velódromo.

Los ensayos se han realizado variando el ángulo de la corriente incidente respecto al velódromo de 15° en 15° , partiendo desde un ángulo $\alpha = 0^\circ$ hasta $\alpha = 165^\circ$ (véase figura I.8). Como se ha dicho en el párrafo anterior, combinando adecuadamente los resultados

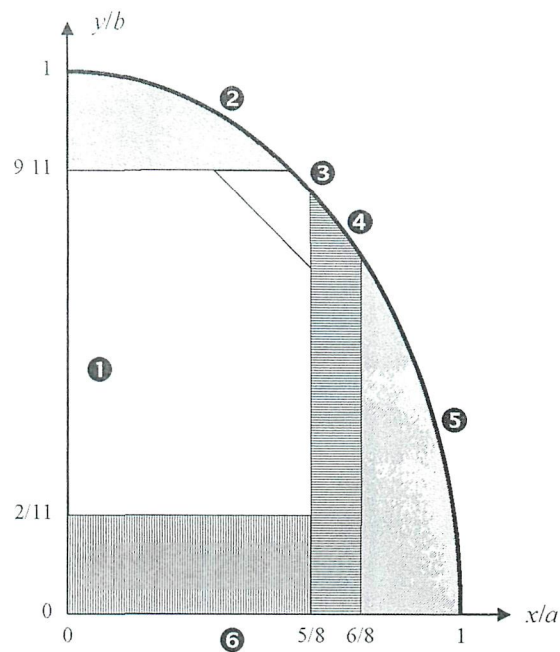


Fig. I.7 Cotas de situación de las tomas en la cubierta del modelo. $\lambda = 50$ mm.

dos a dos se han obtenido los coeficientes de presión en toda la cubierta para los ángulos de incidencia de la corriente $\alpha = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$ y 90° . Estos siete casos conforman el estudio de las cargas aerodinámicas sobre la cubierta del velódromo en su configuración nominal, es decir, con la cubierta levantada sobre las paredes del velódromo tal y como se observa en las figuras I.1 a I.5. Un caso más fue ensayado, esta vez impidiendo por medio de una cartulina el paso de la corriente de aire por debajo de la cubierta. Se midió este último caso en configuración de fachadas cerradas con la corriente a 45° , por ser este el caso en donde las presiones habían resultado más extremas en configuración nominal (véanse las figuras I.8 y I.9).

| CASO | α [°] | Fachada cerrada |
|------|--------------|-----------------|
| 1 | 0 | NO |
| 2 | 15 | NO |
| 3 | 30 | NO |
| 4 | 45 | NO |
| 5 | 60 | NO |
| 6 | 75 | NO |
| 7 | 90 | NO |
| 8 | 45 | SÍ |

Tabla I.1. Casos medidos.

El modelo ha sido instalado en uno de los laterales del túnel aerodinámico A9 (figura I.11), sobre una plataforma giratoria que

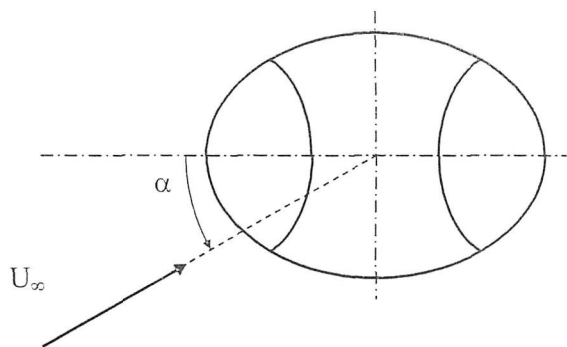


Fig. I.8 Croquis indicativo de la inclinación del viento respecto al velódromo.

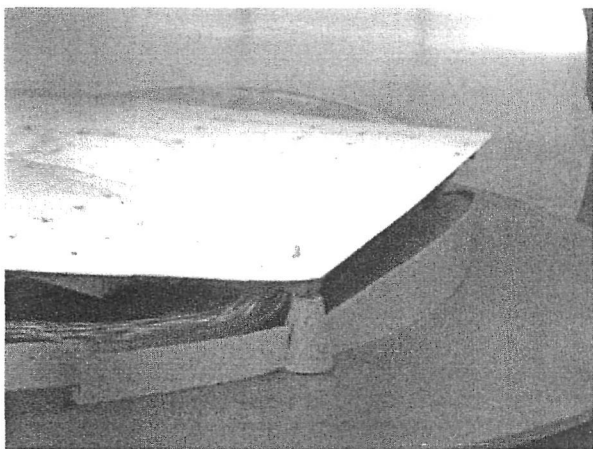


Fig. I.9 Velódromo en configuración nominal.

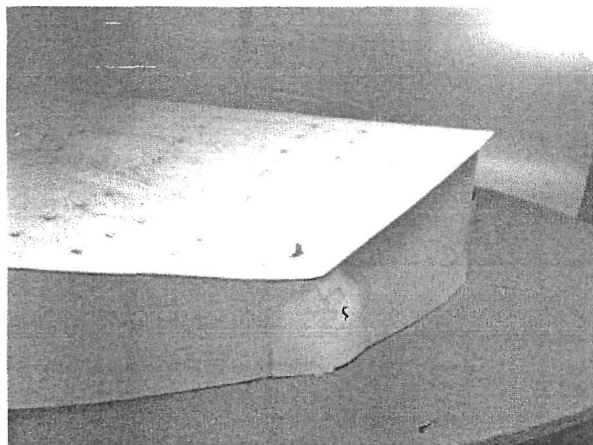


Fig. I.10 Velódromo en configuración de fachadas cerradas.

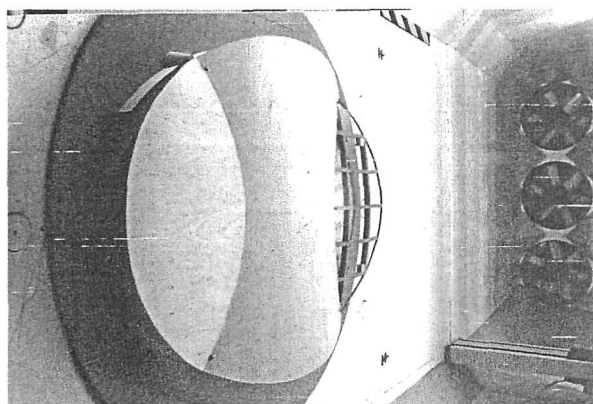


Fig. I.11 Modelo del velódromo situado en el túnel aerodinámico A9.

permite gobernar el ángulo de incidencia de la corriente a según los requisitos del ensayo con una precisión de 1°.

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Las tablas I.2 a I.9, exponen los resultados medidos en cada caso. El valor numérico que contienen estas tablas es el llamado coeficiente de presión, que se define como:

$$C_p = \frac{p - p_\infty}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2} \quad (1)$$

en donde p es la presión medida en la toma en consideración, p_∞ es la presión estática de la corriente incidente, ρ es la densidad del aire y U la velocidad de la corriente de aire incidente ($\frac{1}{2} \rho U^2$ es la presión dinámica, la cual puede expresarse también como q).

Las zonas de mayor carga aerodinámica son los extremos de los semiejes de la cubierta (recuérdese que la planta es elíptica) encarados al viento. Siendo los valores mínimos del coeficiente de presión $c_p = 1.4$ sobre los extremos del eje mayor, y $c_p = 1.9$ sobre los extremos del eje menor.

La carga aerodinámica sobre la cubierta se puede expresar a través del coeficiente de sustentación. El coeficiente de sustentación se define como: $c_l = c_{pi} - c_{pe}$, donde c_{pi} y c_{pe} indican, respectivamente, coeficientes de presión en intradós (la parte inferior de la cubierta) y extradós (la parte superior). Para estimar el valor del coeficiente de sustentación local se ha supuesto que en cada punto el coeficiente de sustentación del extradós, c_{pe} , es el medido en los ensayos y que el coeficiente de sustentación en el intradós, c_{pi} , es el que se tendría en el caso más desfavorable, es decir, si la corriente estuviera remansada bajo la cubierta, en cuyo caso sería $c_{pi} = 1.0$ (aunque el valor recomendado en el Eurocódigo 1 es $c_{pi} = 0.8$).

En la figura 5.1 se presenta la envolvente de las cargas aerodinámicas por zonas de la cubierta en las dos configuraciones,

nominal y de fachadas cerradas. Con envolvente de cargas se hace referencia a los coeficientes de sustentación máximos de los máximos obtenidos en cada caso, en cada zona de la cubierta.

Se ha de destacar que en el caso medido con en velódromo en la configuración de fachadas cerradas, el coeficiente de presión mínimo se dispara hasta $c_p = -2,4$ en el extremo del semieje menor. Lo cual conduce a un coeficiente de sustentación local máximo de $c_l = 3,4$, que representa un incremento de entre el 17% y el 26% de la carga respecto al mismo caso en configuración nominal. Esto es debido a que al cerrar el paso del aire por debajo de la cubierta las velocidades por encima de la misma son más altas, generándose unos torbellinos de succión más fuertes.

Conocido el valor del coeficiente de sustentación, la carga en cada una de las zonas se obtiene multiplicando dicho valor por la presión dinámica de diseño:

$$l = \frac{1}{2} \rho U_{\infty}^2 \cdot c_l \quad (2)$$

Obviamente la carga aerodinámica, l , vendrá dada en N/m^2 o en kg/m^2 según la presión dinámica se exprese en N/m^2 o en kg/m^2 .

Las mayores cargas sobre la cubierta se producen cuando la corriente incide a 45° . Los resultados indican unos picos de coeficiente de sustentación de 2.9 y 3.4 según esté el velódromo en configuración nominal o configuración de fachadas cerradas. Al menos en configuración nominal éstos son unos resultados conservadores, ya que se ha utilizado como coeficiente de presión en el intradós de la cubierta $c_{pi} = 1$ cuando el Eurocódigo recomienda $c_{pi} = 0.8$.

EL TÚNEL AERODINÁMICO A9.

El Túnel A9 del LACE (IDR/UPM) es de corriente aspirada, cámara de ensayos cerrada y circuito fluido abierto (tipo Eiffel).

Según se muestra esquemáticamente en la figura I.12, los elementos que componen el Túnel A9 son la contracción de entrada (1), la cámara de ensayos (2), el difusor que actúa como adaptador a la sección de ventiladores (3) y los ventiladores (4). La contracción es bidimensional: la corriente sólo se contrae en uno de los planos de simetría del túnel, de forma que el techo y el suelo de la contracción son paralelos al techo y al suelo del Laboratorio mientras que las paredes verticales de la contracción describen una curva suave que adapta la sección de entrada a la cámara de ensayos.

107

| Zona de la cubierta | c_{pi} | Configuración nominal | | Configuración fachadas cerradas | |
|---------------------|----------|-----------------------|------------|---------------------------------|------------|
| | | c_{pe} | c_{lmax} | c_{pe} | c_{lmax} |
| ① | 1,0 | -0,6 | 1,6 | -0,6 | 1,6 |
| ② | 1,0 | -1,4 | 2,4 | -1,4 | 2,4 |
| ③ | 1,0 | -0,7 | 1,7 | -1,4 | 2,4 |
| ④ | 1,0 | -0,9 | 1,9 | -0,9 | 1,9 |
| ⑤ | 1,0 | -1,9 | 2,9 | -2,4 | 3,4 |
| ⑥ | 1,0 | -0,7 | 1,7 | -0,7 | 1,7 |

Tabla I.1. Envolvente de las cargas aerodinámicas. Advertencia: el signo positivo en el coeficiente de sustentación quiere decir que la carga aerodinámica tiende a levantar la cubierta del velódromo. Nota: el parámetro a representa el semieje menor y el parámetro b el semieje mayor de la cubierta.

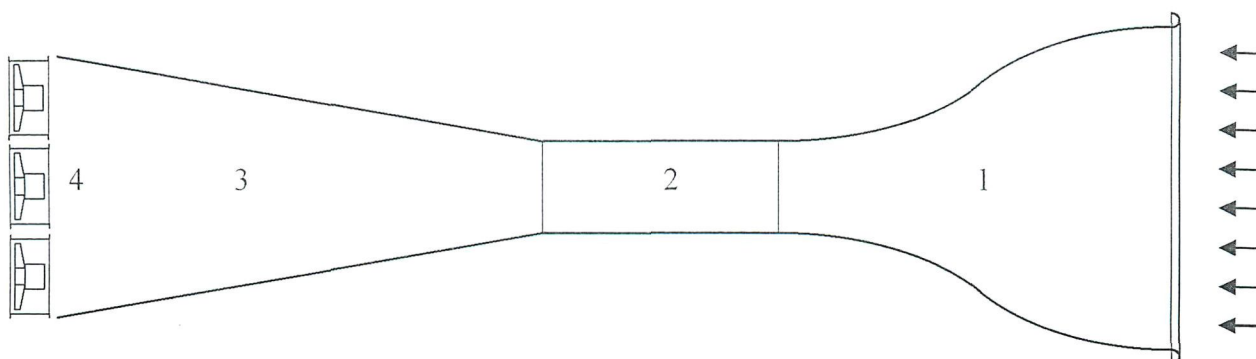


Fig. I.12 Esquema de la planta del Túnel A9: 1) contracción, 2) cámara de ensayos, 3) adaptador y 4) ventiladores.

La contracción tiene una sección de entrada de 4,8 m de ancho y 1,8 m de alto, con una longitud de 5,25 m.

La cámara de ensayos tiene 3 m de longitud y una sección de 1,8 m de alto y 1,5 m de ancho; a la cámara de ensayos se accede desde dos plataformas, una a cada lado del túnel, mediante sendas puertas. Debajo de la cámara de ensayos está la balanza para la medida de cargas aerodinámicas globales, diseñada y construida en el LACE, y en el techo, además del sistema de iluminación de la cámara y los tubos de Pitot que miden la velocidad de referencia, hay una cámara de vídeo que permite al operador observar la ejecución de los ensayos a través del correspondiente monitor situado en la sala de control.

Aguas abajo de la cámara de ensayos está el adaptador a la sección de ventiladores, cuya longitud es de 6 m. El Túnel A9 está impulsado por nueve ventiladores SODECA serie HTC 90, de ocho palas, con una potencia nominal de 10 kW y un diámetro interior de 0,9 m cada uno. Los ventiladores, de velocidad regulable, están dispuestos según una matriz de 3x3 y descargan directamente al local. La velocidad máxima en la cámara de ensayos del Túnel A9 puede superar los 30 m/s, lo que arroja valores del número de Reynolds del orden de 10^6 para las longitudes características habituales de las maquetas (valor por encima del número de Reynolds crítico).

La cadena para la medida de las presiones sobre los modelos, tal como se indica en la figura 5.2, es como sigue: cada maqueta lleva un conjunto de tomas de presión, distribuidas sobre las superficies donde se quiere medir ésta, que se conectan mediante tubos flexibles a uno o más lectores secuenciales, semejantes a un revólver movido por un motor paso a paso. Estos lectores secuenciales (Scanivalve, modelo 48J7-1) tienen, cada uno, 48 entradas más una toma de referencia. La posición de lectura de cada Scanivalve se controla mediante un actuador Scanivalve modelo JS4-48, que va conectando secuencialmente cada una de las entradas con uno de los lados del sensor de presión diferencial instalado en su interior. La posición de lectura en la que se encuentra en cada instante el lector secuencial se determina con un decodificador Scanivalve modelo JÓPOETM-48, instalado en cada una de ellos.

Al mismo tiempo la presión dinámica en la cámara de ensayos se mide con un tubo de Pitot, Airflow modelo 3.3.311, para, a partir de la presión, calcular la velocidad del aire en la cámara de ensayos.

Todas las señales diferenciales de presión se miden con cápsulas Druck modelo PDCR 22, unas instaladas en el interior de las Scanivalve y otra conectada a la señal de presión dinámica.

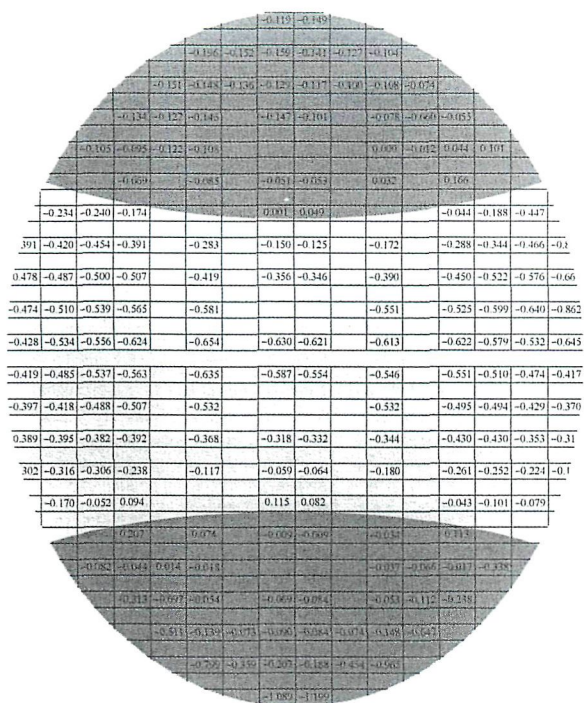


Tabla I.3. Valores del coeficiente de presión medidos en la parte superior de la cubierta cuando la corriente incide con un ángulo de 15° respecto al eje mayor del velódromo.

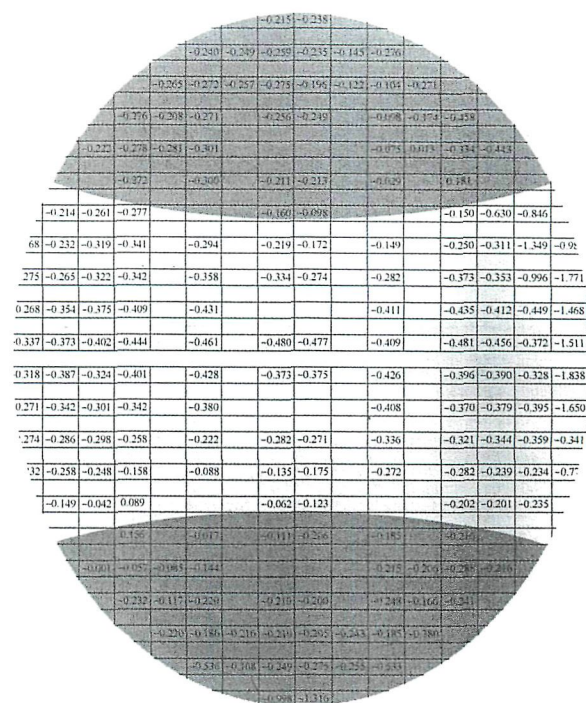


Tabla I.5. Valores del coeficiente de presión medidos en la parte superior de la cubierta cuando la corriente incide con un ángulo de 45° respecto al eje mayor del velódromo.

110

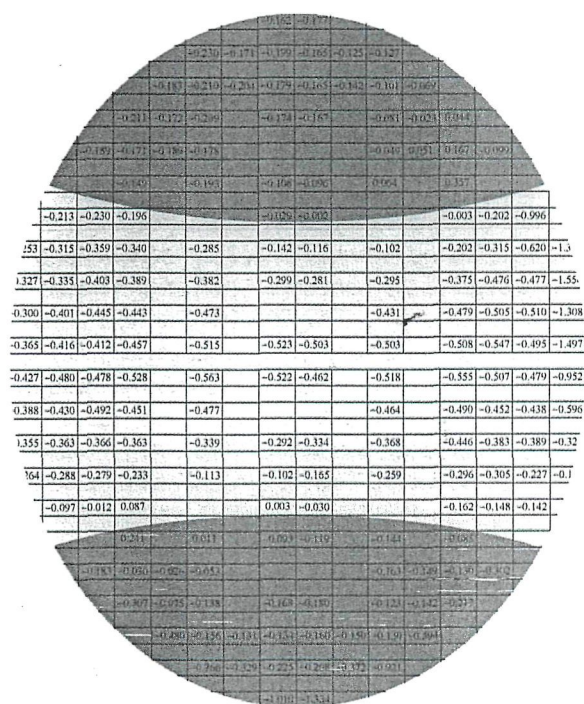


Tabla I.4. Valores del coeficiente de presión medidos en la parte superior de la cubierta cuando la corriente incide con un ángulo de 30° respecto al eje mayor del velódromo.

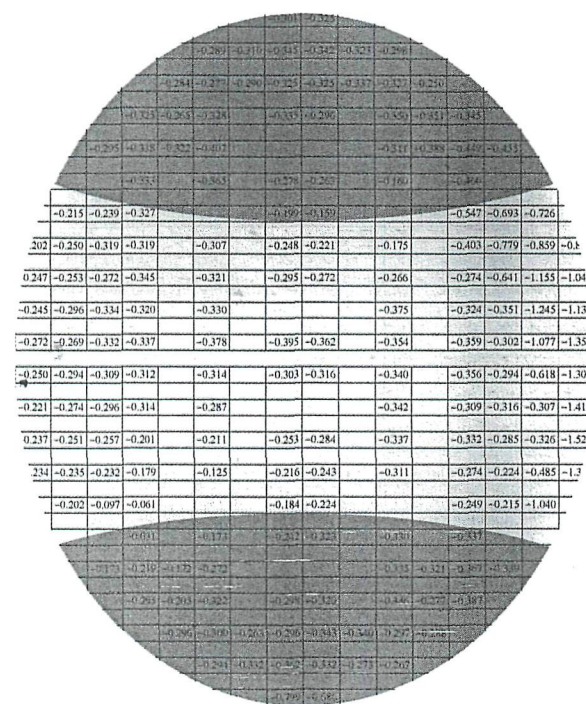


Tabla I.6. Valores del coeficiente de presión medidos en la parte superior de la cubierta cuando la corriente incide con un ángulo de 60° respecto al eje mayor del velódromo.

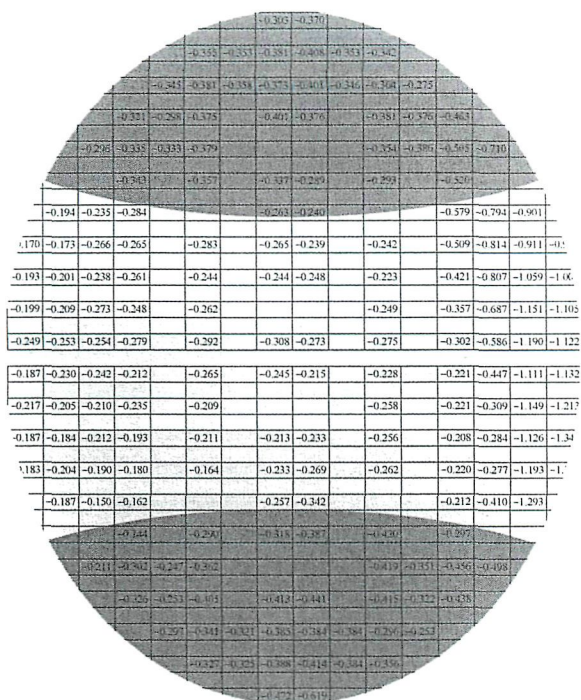


Tabla I.7. Valores del coeficiente de presión medidos en la parte superior de la cubierta cuando la corriente incide con un ángulo de 75º respecto al eje mayor del velódromo.

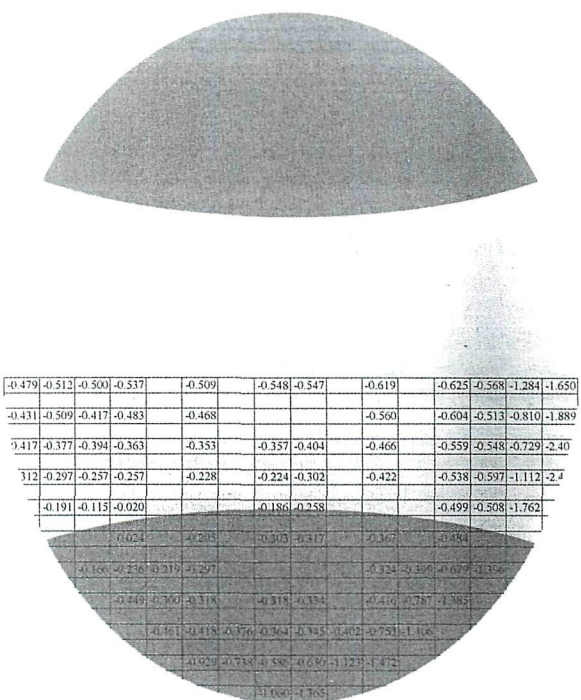


Tabla I.9. Valores del coeficiente de presión medidos en la parte superior de la cubierta cuando la corriente incide con un ángulo de 45º respecto al eje mayor del velódromo, y éste está en su configuración de cubierta cerrada. (Nota, sólo se midió en la mitad en la que se había localizado el mayor pico de succión o presión negativa).

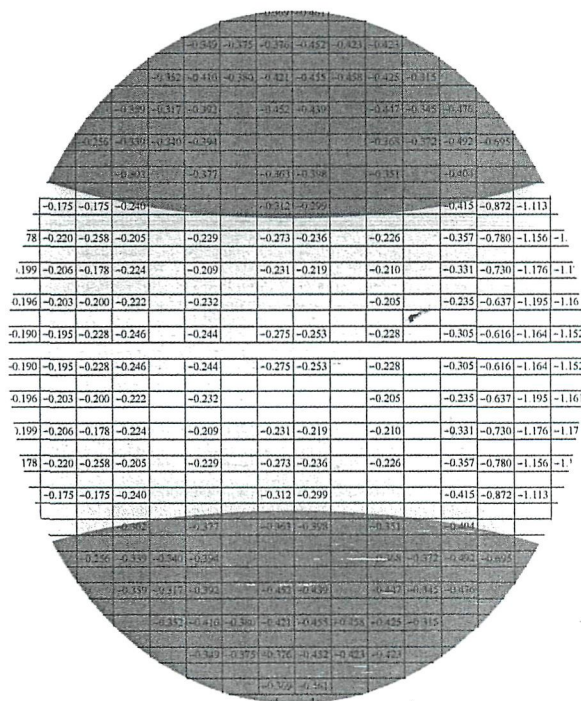


Tabla I.8. Valores del coeficiente de presión medidos en la parte superior de la cubierta cuando la corriente incide con un ángulo de 90º respecto al eje mayor del velódromo.

VALUES OF WIND LOADS ON TO THE ROOF.

The work that is described in this report has been made during the months of April and May of 2000 in the facilities of the Laboratory of Aerodynamics of the University Institute "Ignacio Da Riva" of the Polytechnical University of Madrid (IDR/UPM), located in the E.T.S.I. Aeronáuticos (28040 Madrid) of the mentioned University. The model for aerodynamic tests has been made in the modeling workshop of the IDR/UPM by J. Pascual and M. Ortega.

INTRODUCTION

This report presents the results of the tests of measurement of the aerodynamic loads on the cover of a model of the Dos Hermanas velodrome, in the province of Seville. These tests have been carried out to order of the city council of the locality of Dos Hermanas, by the office of Escrig & Sanchez architects, in the aerodynamic tunnel A9 of the Laboratory of Aerodynamics of the University Institute "Ignacio Da Riva", of the Polytechnical University of Madrid (IDR/UPM).

As it is known, the validity of the tests of measurement of the effects of the wind on models on scale in aerodynamic tunnels, is based on the principle of dynamic similarity of fluids mechanics; this principle establishes that when the air moves around an obstacle, the undimensional results measured in tunnel will be applicable to the reality when geometric similarity exists and when it is fulfilled the equality of the Reynolds numbers, Re , and the equality of the Mach numbers, M_g , associated to the movement around the model on scale and around the real obstacle.

The geometric similarity demands the faithful reproduction on scale of all the aerodynamically significant details of the reality in the models to try. The equality of the Mach numbers, $M_g = U/a$, being U the speed of the striking air stream and a the speed of sound, is only important when the value of this parameter is reasonably greater than zero (so that its value is close to or superior to one), situation that does not take place in most of the applications of the nonaeronautical aerodynamics, in which the speeds at stake are much smaller than the sound one and, consequently, the Mach number is very small and the air behaves as incompressible, ($M_g = 0$).

With respect to the Reynolds number, $Re = UL/\nu$ (being L a characteristic length of the obstacle and ν kinematic viscosity of the fluid), if the fluid in question is the same one in both cases (tests and reality), the equality of the Reynolds numbers demands the conservation of the product UL , which usually is not possible, because when diminishing the characteristic length of the models tried in tunnel, the conservation of the product UL would require to increase the value of the speed in the same proportion, so that the movement would probably stop being incompressible. Therefore the normal thing is that the value of the Reynolds number cannot be conserved, which fortunately is irrelevant in the case of nonaeronautical aerodynamics, because the experience says that when the bodies exposed to the wind are not streamlined nor rounded, the undimensional coefficients of forces and moments are independent of the value of the Reynolds number once this parameter has exceeded a certain value (the so called critical Reynolds).

The reason of this behaviour is that in obstacles with edges or little rounded edges, the boundary layer in these comes off at moderately low speeds, situation that does not change when increasing the speed. Therefore, in most of the applications of the civil aerodynamics it will not be necessary to conserve the Reynolds number, being enough to verify that the tests Reynolds number is over the critical value.

DEFINITION OF THE MODEL OF THE TESTS AND OF THE TRIED CASES

For the implementation of the tests, a model on scale 1:150 of the velodrome was made. In the making of this tests model, it has been used isotropic

agglomerate of wood (MDF), 1.2 mm thick Finnish plywood, beechwood and 2 mm thick meth-acrylate. The surface of the track of the velodrome, the stand and the sidewalls were reproduced in plywood on a MDF base (figure 2.1). The cover was made with a frame of MDF ribs that made up the surface (figure 2.2), covered with a plywood pannel that was cut on scale, according to the velodrome cover dimensions. In a zone of the cover, the plywood was replaced by meth-acrylate, in order to appreciate the interior without having to pick the cover up (figure 2.3). Four cones turned in beechwood serve as support to the cover over the velodrome stand, being made the fixation of the cover by means of threaded rods and nuts with pressure washers (figure 2.4).

On the cover, 92 pressure intakes were installed, consisting each one in a hole that communicated with a brass tube of 1 mm of inner diameter, and this one with a plastic tube that transmitted the pressure until the measurement instrument (figure 2.5). The intakes distribution follows the scheme shown in the sketch of figure 2.6; in this one, all the measures are referred to the parameter $\ddot{e} = 50$ mm. It can be observed that there are only pressure intakes in one of the halves of the cover; this is due to the symmetry of the velodrome, which allows to complete each one of the cases with two tests.

The tests have been made changing the angle of the striking air stream with respect to the velodrome 15° at a time, starting off from an angle $\acute{\alpha} = 0^\circ$, up to $\acute{\alpha} = 165^\circ$ (see figure 2.7). As it is mentioned in the previous paragraph, combining suitably the results in two pairs, the coefficients of pressure in all the cover for the angles of striking air stream $\acute{\alpha} = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$ and 90° have been obtained. These seven cases make up the study of the aerodynamic loads on the cover of the velodrome in their nominal configuration, that is to say, with the cover erected on the walls of the velodrome, as it is observed in figures 2.1, 2.2, 2.3 and 2.4. An extra case was tried, this time preventing the passage of the airflow below the cover by means of a thin cardboard. In this last case, the measurement was made in a configuration of closed façades, with the air stream at an angle of 45° because this was the situation in which the pressures had been more extreme in the nominal configuration (see figures 2.8 and 2.9).

Table 2.1. Measured cases.

The model was installed in one of the sides of the aerodynamic tunnel A9 (figure 2.10), on a spinning platform that allowed to change the angle of the striking air stream according to the requirements of the test, with a precision of 1° .

RESULTS AND CONCLUSIONS

The tables of the attached document n. 2, show the measured results in each case. The numerical value that these tables contain is the so called pressure

coefficient, that is defined as:

$$c_p = \frac{p - p_\infty}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2} \quad (1)$$

being p the pressure measured in the considered intake, p_s the static pressure of the striking air stream, \bar{n} the density of air and U_s the speed of the striking air stream (being $\frac{1}{2} \bar{n} U_s^2$ the dynamic air pressure, which can also be expressed as q). The zones of greater aerodynamic loads are the ends of the cover semiaxes (remember that the plan is elliptical) which faces the wind. Being the minimum values of the pressure coefficient $cp = -1.4$ on the ends of the greater axis, and $cp = -1.9$ on the ends of the smaller axis.

The aerodynamic load on the cover can be expressed through the support coefficient. The support coefficient is defined as: $C_i = c_{pi} - c_{pe}$, being c_{pi} and c_{pe} the respective indicators of the coefficients of pressure in the intrados (the inferior part of the cover) and in the extrados (the superior part). In order to estimate the value of the local support coefficient c_{pi} , it has been assumed that in every point, the support coefficient of the extrados, c_{pe} , is the one measured in the tests, and that the support coefficient in the intrados is the one obtained in the most unfavorable case, that is to say when the air stream forms a pool under the cover, being in that case $c_{pi} = 1.0$ (although the value recommended in the Eurocode 1 is $c_{pi} = 0.8$).

The figure 3.1 shows the of the aerodynamic loads of the cover by zone, according to the two chosen configurations: the nominal one and that of closed façades. The of loads refers to the maximum support coefficients among the maximums obtained in each case, in each zone of the cover.

It should be emphasized that in the case measured with the velodrome in the configuration of closed façades, the minimum pressure coefficient shoots up to $cp = -2.4$ in the end of the smaller semiaxis. Which leads to a maximum local support coefficient of $cl = 3.4$, that represents an increase between 17% and 26% of the load with respect to the same case in the nominal configuration. The reason for this is that when the air flow below the cover is blocked, the speed over the cover is higher, being generated stronger suction eddies.

When knowing the value of the support coefficient, the load in each one of the zones is obtained multiplying this value by the design dynamic pressure:

$$I = \frac{1}{2} \rho U_\infty^2 \cdot c_i \quad (2)$$

Obviously, the aerodynamic load, I , will be expressed as N/m^2 or kg/m^2 , depending on how the aerodynamic pressure is expressed (as N/m^2 or kg/m^2).

The greater loads on the cover take place when the air stream strikes at a 45° angle. The results show peaks in the support coefficient of 2.9 and 3.4,

depending on that the velodrome is in nominal or in closed façades configuration. In nominal configuration these are at least conservative results, since c_{pi} has been used as the pressure coefficient in the intrados of the cover $c_{pi} = 1$, when the Eurocode recommends $c_{pi} = 0.8$.

Figure I.1. Interior of the velodrome. Track, sidewalls and stand.

Figure I.2. Frame of the velodrome cover.

Figure I.3. Velodrome cover. Detail of the methacrylate made part.

Figure I.4. Velodrome cover.

Figure I.5. View of the lower side of the covering, in order to observe the system of pressure intakes of the velodrome cover.

Figure I.6. Spots of situation of the intakes in the cover of the model. $\bar{e} = 50$ mm.

Figure I.7. Sketch that indicates the inclination of the wind with respect to the velodrome.

Figure I.8. The velodrome in its nominal configuration. Figure I.9. The velodrome in its closed façades configuration.

Figure I.10. Model of the velodrome located in the aerodynamic tunnel A9.

Table I.1. of the aerodynamic loads. Warning: the positive sign in the support coefficient means that the aerodynamic load tends to lift the cover of the velodrome. Note: the parameter a represents the smaller semiaxis, and parameter b the greater semiaxis of the cover.

113

THE AERODYNAMIC TUNNEL A9

The LACE A9 Tunnel (IDR/UPM) works with sucked air stream, closed tests chamber and opened fluid circuit (Eiffel type).

As it is schematically shown in the figure I.11, the elements that make up the A9 Tunnel are the entrance contraction (1), the tests chamber (2), the diffuser that acts as an adapter to the fans section (3) and the fans (4). The contraction is bidimensional: the air stream only gets contracted in one of the symmetry plans of the tunnel, so that the ceiling and the floor of the contraction are parallel to the ceiling and the floor of the laboratory, whereas the vertical walls of the contraction describe a smooth curve that adapts the entrance section to the tests chamber. The contraction has an entrance section 4.8 m wide, 1.8 m high, and 5.25 m long.

Figure I.11. Scheme of the A9 Tunnel plan: 1) contraction, 2) tests chamber, 3) adapter and 4) fans. The tests chamber is 3 m long and its section is 1.8 m high and 1.5 m wide; two individual doors lead to the tests chamber from two platforms located in both sides of the tunnel. Under the tests chamber, there are scales for the measurement of global aerodynamic loads, designed and made in LACE; in the ceiling, in addition to the chamber lighting system and the Pitot tubes that measure the speed of reference, there is a video camera that allows the operator to observe the implementation of the tests

through the relative monitor located in the control room.

Going ahead the tests chamber, it can be found the adapter to the fans section, whose length is of 6 m. The A9 Tunnel is impelled by nine fans SODECA series HTC 90, with eight blades, a nominal power of 10 kW and an inner diameter of 0.9 m each of them. The fans, with adjustable speed, are located according to a 3x3 matrix and are directly aimed to the premises. The maximum speed in the tests chamber of the A9 Tunnel can exceed 30 m/s, which produces values of the Reynolds number about 106 for the usual characteristic length of the scale models (value that is over the critical Reynolds number).

The chain for the measurement of the pressures on the models, as it is indicated in the figure 5.2, develops as follows: each scale model has a set of pressure intakes, distributed on the surfaces where pressure must be measured, that are connected by means of flexible tubes to one or more than one sequential readers, similar to a revolver, powered step by step by a motor. These sequential readers (Scanivalve, model 48J7-1) have, each one, 48 entrances plus a reference intake. The reading location of each Scanivalve is controlled by means of a Scanivalve actuator model Js4-48, that connects sequentially each one of the entrances with one of the sides of the differential pressure sensor installed inside it. The reading location in which the sequential reader is at every moment is determined with a Scanivalve decoder model JOPOETM-48, installed in each one of them.

At the same time the dynamic pressure in the tests chamber is measured with a Pitot tube, Airflow model 3.3.311, with the purpose of calculate, from the pressure, the speed of the air in the tests chamber. All the differential pressure signals are measured with Druck capsules, model PDCR 22, some of them installed inside the Scanivalves and another one connected to the dynamic pressure signal.

Tomas de presión= pressure intakes.

Lector secuencial= sequential reader.

Sensor de presión= pressure sensor.

Sensor de posición= location sensor.

Controlador= controller.

Acondicionador= conditioner.

Tubo de Pitot= Pitot tube.

Balanza= scales.

Células de carga= cells of load.

Filtros= filters.

Entrefase= interphase.

Sistema de adquisición de datos= data collection system.

Ordenador= computer.

Figure I.12. Block diagram of the Tunnel A9 measurement chain.

The electric signal generated in the pressure capsules, is conducted to individual signal conditioners, Druck model DPI 260, that in addition, provide a digital display of the value of the pressure that is being measured. The analogical electrical

signals, once filtered, are measured by a system of data collection IOTech model ADC 488, connected to a bus IEEE 488 controlled by a computer. This equipment of data collection also has digital entrances and exits that allow to control and to verify, through the relevant interphase, the reading location of the sequential readers.

In addition, the aerodynamic tunnel A9 has other equipment as extensometric scales and cells of load (that make possible the measurement of up to 6 components (3 forces and 3 moments) in an independent way), a hot wire system of velocimetry, and a high speed camera to visualize the flow by means of tracers.

MEASURED DATA

Table I.2. Pressure coefficient values measured in the upper part of the cover, when the air stream strikes at an angle of 0° with respect to the greater axis of the velodrome.

Table I.3. Pressure coefficient values measured in the upper part of the cover, when the air stream strikes at an angle of 15° with respect to the greater axis of the velodrome.

Table I.4. Pressure coefficient values measured in the upper part of the cover, when the air stream strikes at an angle of 30° with respect to the greater axis of the velodrome.

Table I.5. Pressure coefficient values measured in the upper part of the cover, when the air stream strikes at an angle of 45° with respect to the greater axis of the velodrome.

Table I.6. Pressure coefficient values measured in the upper part of the cover, when the air stream strikes at an angle of 60° with respect to the greater axis of the velodrome.

Table I.7. Pressure coefficient values measured in the upper part of the cover, when the air stream strikes at an angle of 75° with respect to the greater axis of the velodrome.

Table I.8. Pressure coefficient values measured in the upper part of the cover, when the air stream strikes at an angle of 90° with respect to the greater axis of the velodrome.

Table I.9. Pressure coefficient values measured in the upper part of the cover, when the air stream strikes at an angle of 45° with respect to the greater axis of the velodrome, and this one presents a closed cover configuration. (Note: the measurement was carried out only in the half in which the higher suction peak or negative pressure had been located).